

6号砕石を有するポーラスコンクリートの圧縮特性に及ぼす固相容積と結合材の強度特性 Effect of Solid Volume and Binder Strength on Compressive Property for No.6 Crushed Aggregate Porous Concrete

実積率 振動締固め ヤング係数
平均値 標準偏差 変動係数

会員外 ○早川 葵* Aoi HAYAKAWA
同 水野 佑紀* Yuki MIZUNO
同 原田 沙那* Saya HARADA
正会員 山本 貴正** Takamasa YAMAMOTO

1. はじめに

1.1 本研究の背景・目的

ポーラスコンクリート(以下、POC)の調合設計では、一般に、固相である粗骨材の単位容積当りの容積(以下、固相容積率)を JIS_A_1104 に準拠し測定した実積率とする。しかし、混練された POC の固相容積率は、粗骨材周辺に結合材が被覆されるため、実積率と比較して低くなる。このことから、空隙率の調合値と観測値は差が生じる。また、POC の強度試験において、結合材の強度特性が影響するとされているが、結合材は、管理用試験体の作製に労力を必要とし、強度に関する試験値が不明確である。よって、既往研究で提案されている強度と空隙率の関係式には、結合材の強度を反映しているとは言い難い。

以上を踏まえ、まず使用頻度の高い6号砕石を有する POC(以下、6号砕石 POC)の管理用円柱試験体の圧縮特性について、固相容積率と結合材の強度特性に着目し、実験的に検討を進めている。

1.2 関連する既往研究

(a) 全空隙率の標本変動係数

POC の全空隙率は、標本平均が高いデータ群ほど標本変動係数が小さくなる傾向がある。標本平均が6号砕石 POC の全空隙率の標本変動係数の上限値(COV_{max})として、次式が得られている¹⁾。

$$COV_{max} = -0.34P + 14.5 \quad (1)$$

ここに、 P : 全空隙率(%)

(b) 圧縮強度の標準偏差・変動係数

POC の圧縮強度の標本標準偏差は、著しい垂れが生じていなければ、JASS 5に示されている普通コンクリートの値よりも小さい²⁾。また、標本変動係数は、レディミクストコンクリートにおいて良好な管理がなされているかの目安となる上限値10%程度で、普通コンクリートに比べ若干ばらつきが大きいと見なすことができる¹⁾。

(c) 圧縮強度－空隙率関係

POC の圧縮強度(F)-全空隙率(P)関係は、一般的な脆性多孔質材料に用いられる次の指数関数式で近似できる¹⁾。

$$F = A \cdot \exp(B \cdot P) \quad (2)$$

ここに、 A : 結合材の圧縮強度、 B : 実験変数
式(2)の適用は、骨材破壊が生じていない、および結合材の著しい垂れが生じていないことが条件となる。

2. 実験概要

2.1 実施試験

容器を管理用円柱型枠とした固相である粗骨材の実積率試験、固相容積率を計測する洗い試験、POC の空隙率を計測する空隙率試験、POC と結合材の圧縮強度およびヤング係数それぞれを計測する圧縮試験を主に実施した。

2.2 実験要因・水準

実積率に関わる実験の要因は、突き棒による突き固め回数(以下、棒突き回数)とし、水準は2層15回、2層20回および2層30回である。その他の実験要因は、空隙率の設計値とし、水準は10%、25%および42.2%(結合材なし)である。設計値25%については、圧縮試験における材端条件を実験要因とした。材端条件は、両端ピン支持と両端固定支持である。

2.3 使用材料

水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメント(密度=3.15g/cm³)を使用した。粗骨材は瀬戸産の6号砕石(粒径=5-13mm、表乾密度=2.70g/cm³、吸水率=0.52%、実積率=57.8%)を用いた。

2.4 試験体作製

POC を容量 100l の二軸強制練ミキサで混練して作製した。まず結合材であるセメントペーストを先練し、管理用試験体を作製するため、ミキサ内から採取した結合材を5体の管理用円柱型枠(内径100mm・内高200mm)に打設した。続いて、ミキサ内に残留している結合材容積

* 愛知工業大学工学部建築学科 本科生

** 愛知工業大学工学部建築学科 准教授 博士(工学)

Undergraduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

の推定値から、調合空隙率 0%(設計空隙率 10%)を満たす容積分の粗骨材をミキサに投入し、POC を混練した。ここではミキサ内の POC を、10 体の管理用円柱型枠に打設した。10 体中 5 体は POC 管理用試験体であり、時間 10 秒でバイブレーティングタンパによる振動締め固めを施した。残り 5 体は、洗い試験用である。なお、POC を、実積率試験結果より(後述 3.1 参照)、円柱型枠に 2 層 30 回突きで詰め込み、最後に各型枠の上面に揃うようにならした。その後、上記と同様に調合空隙率 20%(設計空隙率 25%)の POC を混練し、管理用試験体を作製した。

結合材は、水セメント比 35%、フロー観測値 179mm (JIS_R_5201)および空気量観測値 1.8%(JIS A 1171)である。型枠に打設した POC は、材齢 3 日後に脱型し、28 日強度実施日まで水中養生をした。なお、材齢 21・22 日に空隙率試験を実施している。

2.5 試験方法

実積率試験は、JIS_A_1104 に準拠した。なお、サンプル数は 5 また容器は管理用円柱型枠(内径 100mm・内高 200mm)とした。洗い試験は、JIS_A_1112 に準拠し、固相容積率、結合材の単位容積当りの容積(以下、結合材容積率)および次式の空隙率[打設時空隙率(P_{inn})]を計測した。

$$P_{inn} = 1.0 - (G + B) \quad (2)$$

ここに、 G ：固相容積率、 B ：結合材容積率

結合材の密度は、空気量計測値と調合表を用いて算出した。空隙率試験は JCI-SPO2-1 の容積法、圧縮強度試験は、JIS_A_1108 に準拠した。また JIS_A_1149 に準拠しヤング係数を計測した。ただし、コンプレッソメータと POC の接点に、厚さ 0.3mm のアルミを 3 枚挿入した。なお、圧縮試験体の両端面の平滑を確保するために、各々硫黄キャッピングを施した。この上端面の角度の最大値(以下、端面平滑度)を水準器で計測している。

3. 実験結果・考察

3.1 実積率試験

図-1 に、POC の固相である粗骨材の実積率の標本平均と棒突き回数の関係を示す。破線は JIS 容器実積率、括弧内は標本変動係数である。

同図より、棒突き回数が多いほど、実積率の標本平均が高くなる、かつ標本変動係数が小さくなることがわかる。これは、突固め量が増すほど、骨材は粒子配列が緻密化して安定した組織になるためと考えられる。また、実積率の標本平均と JIS 容器実積率の差が最も小さい棒突き回数は 2 層 30 回であることがわかる。

棒突き回数 2 層 30 回の実積率の標本平均と JIS 容器実積率の差を t 検定すると、有意水準 0.05 で差はあると言えない^{注1)}。そこで、本実験では、POC の管理用円柱型

枠への打設において、棒突き回数を 2 層 30 回とした。以降、管理用円柱型枠に棒突き回数 2 層 30 回で詰め込まれた粗骨材を、全空隙率の標本平均 42.2%、換言すると固相容積率の標本平均 57.8%の POC として扱う。

3.2 洗い試験

(a) 打設時空隙率の標本平均

図-2 に、固相容積率と設計空隙率の関係を示す。括弧内は式(2)の打設時空隙率の標本平均である。

同図より、設計空隙率が高いほど、固相容積率の標本平均が高いことがわかる。これは、設計空隙率が高いほど、骨材を被覆する結合材の膜厚が減り、隣り合う骨材間の距離が短くなることが起因していると考えられる。

(b) 固相・結合材容積率の観測値

図-3(a)(b)に、各設計空隙率の固相と結合材の容積率と打設時空隙率の観測値の関係を示す。図中には、相関係数(R)と最小二乗法による近似直線が示してある。

同図より、各設計空隙率ともに、固相と結合材の容積率それぞれの観測値は、打設時空隙率の観測値と負の相関が認められる。以上のことから、同一条件試験体の空隙率の統計的変動は、固相容積率と結合材容積率が影響する、換言すると、型枠に詰められる POC の骨材量と結合材量の双方が影響すると考えられる。

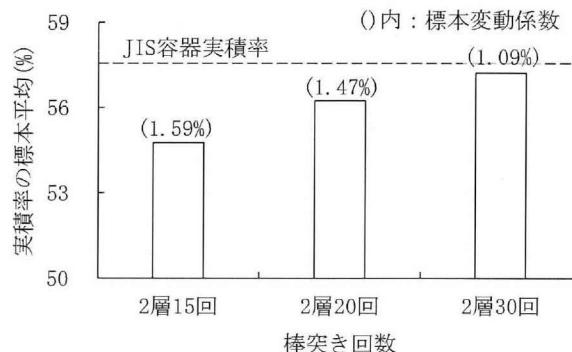


図-1 実積率の標本平均と棒突き回数

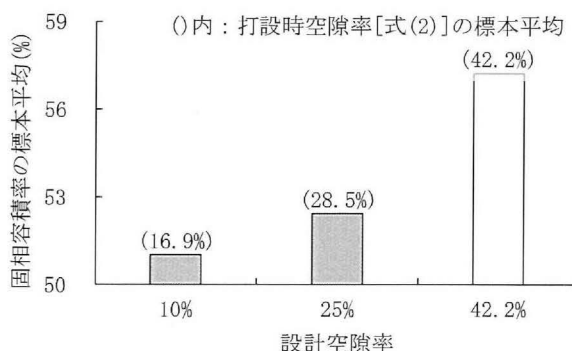
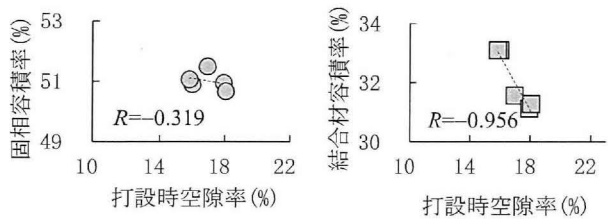
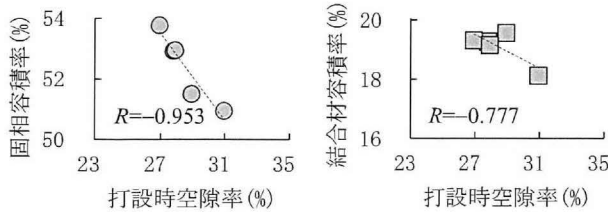


図-2 固相容積率と打設時空隙率の標本平均



(a) 設計空隙率10%



(b) 設計空隙率25%

図-3 固相・結合材容積率と打設時空隙率の観測値

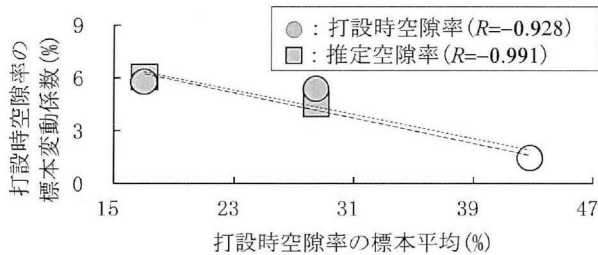


図-4 打設時空隙率の標本変動係数と標本平均

(c) 打設時空隙率の基本統計量

図-4 に、打設時空隙率の標本変動係数と標本平均の関係を示す。図中には、相関係数と最小二乗法による近似直線が示してある。また、固相容積率と結合材容積率から推定した打設時空隙率(以下、推定空隙率)の標本変動係数と標本平均の関係を併せて示してある。推定空隙率の標本平均および標本標準偏差は、表-1 に示すように、それぞれ各容積率に平均値を代入した式(2)および各容積率の標本標準偏差の二乗平方和とした。

同図より、打設時空隙率および推定空隙率の標本変動係数と標本平均は、それぞれ負の相関が認められる。これは、空隙率が高いほど、換言すると、結合材容積率が低いほど、固相の粗骨材に対する結合材の被覆の均一性が高くなるためと考えられる。

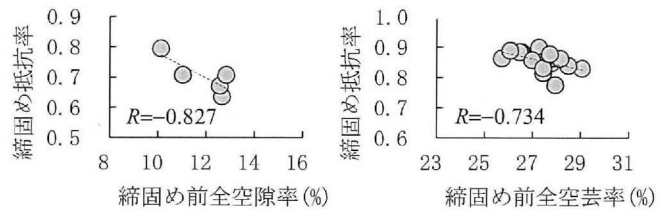
3.3 空隙率試験

図-5(a) (b)に、各設計空隙率の締固め後の全空隙率と締固め前の全空隙率の関係を示す。縦軸は、締固め前の全空隙率で除してある(以下、締固め抵抗率)。同図より、各設計空隙率ともに、縦軸と横軸は負の相関の傾向が認められる。

図-6 に、全空隙率の標本変動係数と標本平均の関係

表-1 固相・結合材容積率から推定した打設時空隙率

設計空隙率		10.0%	25.0%	42.2%
固相容積率	標本平均 $[G_m]$ (%)	51.0	52.4	57.2
	標本標準偏差 $[s_G]$ (%)	0.304	1.159	0.621
	標本変動係数 (%)	0.595	2.212	1.086
結合材容積率	標本平均 $[B_m]$ (%)	32.0	19.1	0
	標本標準偏差 $[s_B]$ (%)	0.981	0.557	0
	標本変動係数 (%)	3.065	2.916	-
推定打設時空隙率	標本平均 $[1.0-(G_m+B_m)]$ (%)	17.0	28.5	42.8
	標本標準偏差 $[(s_G^2+s_B^2)^{0.5}]$ (%)	1.027	1.29	0.621
	標本変動係数 (%)	6.039	4.511	1.451



(a) 設計空隙率10%

(b) 設計空隙率25%

図-5 締固め後と前の全空隙率

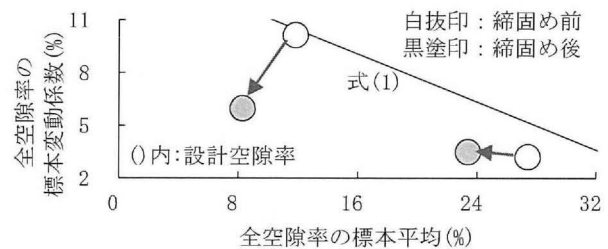


図-6 全空隙率の標本変動係数と標本平均

に及ぼす振動締固めの影響を示す。図中の実線は、式(1)である(前述 1.2(a) 参照)。

同図より、締固め前後の全空隙率とともに、標本変動係数は上限値以下であることがわかる。また、設計空隙率 25%の全空隙率に及ぼす振動締固めの影響は、設計空隙率 10%と比較して小さいことが認められる。

上記については、前述 3.2(a)を踏まえ、同一条件試験体において、締固め前全空隙率が低いほど、固相容積率が高いために、結合材被覆骨材の配列が緻密化しており、振動下の POC の沈下抵抗性が大きいことが起因していると考えられる。

3.4 POC の圧縮試験結果

(a) 材端条件の影響

表-2 に、POC の圧縮試験を両端固定と両端ピンで実施した各試験値の比較を示す。参考のため全空隙率が併せて示してある。なお以降、全空隙率は締固め後である。

同表に示すように、各試験値ともに有意水準 0.05 では材端条件の差はあるとは言えない。このことから、以降、圧縮試験値に及ぼす材端条件の影響はないとする。

表－2 試験値の両端固定と両端ピンの差の検定結果

項目	両端固定			両端ピン			P値	
	n	m	s	n	m	s	m	s
全空隙率(%)	5	23.3	0.64	11	23.5	0.91	0.323	0.122
圧縮強度(N/mm ²)	5	13.1	3.58	11	15.00	1.97	0.134	0.078
ヤング係数(kN/mm ²)	4	21.2	3.74	7	19.9	5.22	0.334	0.186

n：標本数，m：標本平均，s：標本標準偏差

P値：標本平均はt検定，標本標準偏差はF検定

(b) 圧縮強度と全空隙率の関係

図－7 に，圧縮強度と全空隙率の関係を示す。結合材の圧縮強度を，全空隙率 0%として打点してある。図中に示す $R_{ln(Y)-X} = -0.946$ および実線は，それぞれ全データ群を対象とした圧縮強度の自然対数と全空隙率の相関係数および最小二乗法で求めた指数近似曲線である。

同図より，自然対数の縦軸と横軸は，負の相関があり，既報と同様に，圧縮強度－全空隙率関係は指数関数で近似できることがわかる。これは，既報と比較して，結合材強度が低いため，骨材破壊が生じにくいことが起因していると考えられる。

(c) 圧縮強度と端面平滑度の関係

図－8 に，標準化した圧縮強度の図－7 に示す指数近似式で算出した計算値に対する観測値と端面平滑度の関係を示す。図中には，相関係数(R)が示してある。標準化において，平均値および標準偏差それぞれ計算値に対する観測値の標本平均および標本標準偏差を使用している。

同図より，縦軸の計算値に対する観測値は，1 体は±3 に，その他は±2 に存在していることがわかる。また縦軸と横軸の相関性はないことが認められる。

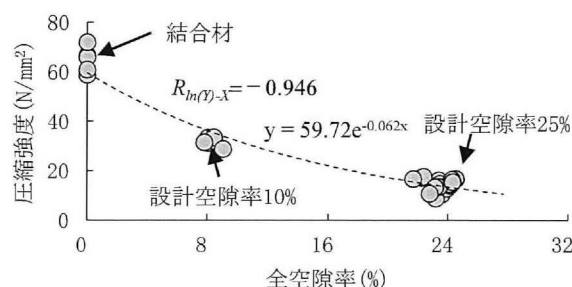
(d) ヤング係数－空隙率関係

図－9 に，ヤング係数と全空隙率の関係を示す。結合材のヤング係数を，全空隙率 0%として打点してある。括弧内は，各データ群のヤング係数の標本変動係数である。なお，コンプレッソメータによる変位の計測値が，初期値から引張側に生じている試験体は，除外している。

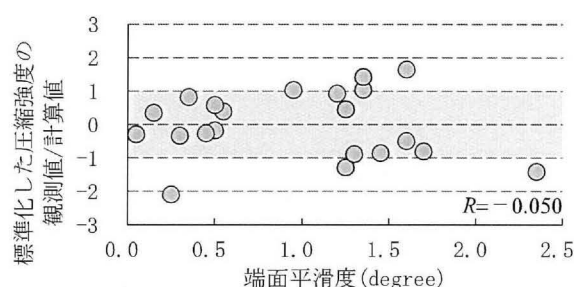
同図より，結合材のヤング係数は，設計空隙率 10%と比較して小さいことがわかる。これは，固相である粗骨材のヤング係数が，結合材と比較して高いことが起因していると考えられる。また，設計空隙率 25%の標本変動係数は，設計空隙率 10%と比較して大きい。これは固相容積率の統計的変動(前述 3.2(c) 参照)，振動締固めにおける沈下抵抗性(前述 3.3 参照)が影響していると考えられるが，現状では不明であるため，今後，再検討する。

4. おわりに

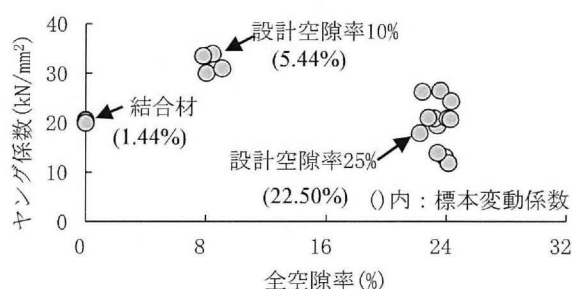
使用頻度の高い 6 号砕石 POC の管理用円柱試験体の圧縮特性について，固相容積率と結合材の強度特性に着目し，実験的に検討を進めた。



図－7 POCの圧縮強度と全空隙率の関係



図－8 POCの圧縮強度の計算値



図－9 POCのヤング係数と全空隙率の関係

謝辞

本稿の研究成果は，平成 31 年度愛知工業大学研究特別助成の支援による。

注

注1) JIS 容器実積率の標準偏差は不明であるため，棒突き回数 2 層 30 回の実積率の標本標準偏差とした。

参考文献

- 1) 畑中重光(編著)：透水性コンクリート(POC)の基礎と実践，コンクリート新聞社，初版，2019.8
- 2) 山本貴正，小池狭千朗，牧野智英，畑中重光：ポーラスコンクリートの空隙率・圧縮強度の変動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.289-294，2008
- 3) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，2015.6